

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**PROFESOR PATROCINANTE:
DR. JOSÉ NORAMBUENA CONTRERAS**

**PROFESOR CO-GUIA:
ING. JOSÉ L. CONCHA FUENTEALBA**

**COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE
PAVIMENTOS ASFÁLTICOS CON RESIDUOS
METÁLICOS: UNA EVALUACIÓN COMO
COLECTOR SOLAR**

**PROYECTO DE TÍTULO PRESENTADO EN CONFORMIDAD A LOS REQUISITOS
PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

ERIC ANTONIO AGUILERA SOTO

Concepción, Marzo de 2017

DEDICATORIA

*Dedicado a mis padres Eric y Mariela,
y a mis hermanos Alejandro y Gustavo por apoyarme siempre...*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo incesante de mi profesor guía Dr. José Norambuena, su disposición y confianza durante este proceso. Además, quiero destacar su calidad como persona y docente, ya que desde el inicio me consideró parte del proyecto y además me asignó un tema de tesis que pienso se ajusta a mi perfil, factor que me motivó más aún en el desarrollo de este estudio. Rescato también, su exigencia y dedicación, ya que demuestra que como profesional ansía desenvolverse de manera correcta y eficiente en lo que se propone, valores que admiro y me gustaría integrar.

De igual forma, agradezco al equipo del LabMAT, a José Luis Concha por la capacitación con los equipos del laboratorio y apoyo durante todo el proceso de la investigación, además de tener siempre la mejor actitud y paciencia para aclarar dudas y ayudar en los ensayos y en realidad por su constante preocupación por ayudarme a mejorar y para que el resultado de esta investigación resultara exitoso. Agradezco también, a Irene González-Torre por facilitar los espacios del laboratorio en todo momento que fuera requerido, su forma eficaz y organizada de realizar las actividades hizo más fácil el desarrollo de este estudio.

También, agradecer a la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT) del Gobierno de Chile, por el apoyo financiero otorgado al Proyecto FONDECYT de Iniciación 2014 N°11140103 del cual forma parte este estudio.

Además, agradecer a mi padre Eric Aguilera por su cooperación en la fabricación del dispositivo térmico con altura regulable y a mi hermano Gustavo Aguilera por su apoyo en el secado de placas del dispositivo de calentamiento infrarrojo y la fabricación del colector solar en las dependencias del taller de prototipos de Diseño industrial de la Universidad del Bío-Bío.

Finalmente, agradecer de manera muy especial a mis padres Eric y Mariela por todos los años de confianza, paciencia y sacrificio para llegar a este momento.

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS REFORZADOS CON RESIDUOS METÁLICOS: UNA EVALUACIÓN COMO COLECTOR SOLAR

Eric Aguilera Soto

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío
eraguile@alumnos.ubiobio.cl

Dr. José Norambuena Contreras

LabMAT, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío
jnorambuena@ubiobio.cl

Ing. José L. Concha Fuentealba

LabMAT, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío
jlconcha@ubiobio.cl

RESUMEN

En esta investigación se ha evaluado la influencia del tipo y contenido de dos diferentes residuos metálicos sobre el comportamiento térmico de mezclas asfálticas y su utilización como material absorbente de radiación solar. Con este objetivo, se han estudiado en laboratorio nueve diferentes diseños de mezclas asfálticas, empleando la misma granulometría y contenido de cemento asfáltico, pero con dos diferentes tipos de residuos metálicos: virutas de acero y fibras de lana de acero. Así, se han evaluado diferentes propiedades termo-físicas (conductividad térmica, calor específico y difusividad térmica) en probetas de mezclas asfálticas con y sin adición de residuos metálicos. Además, se evaluó el comportamiento térmico de un prototipo de colector solar de pavimento asfáltico con un 4% de fibras de lana de acero. Este prototipo de colector solar fue ensayado bajo condiciones de máxima irradiancia para la Ciudad de Concepción y simuladas experimentalmente usando radiación infrarroja. Los principales resultados de este estudio mostraron que la transferencia de calor medida en las mezclas asfálticas fue más eficiente en las mezclas con fibras de lana de acero, que en las mezclas con virutas metálicas. Además, se comprobó que el prototipo de colector solar asfáltico presentó un buen comportamiento térmico, permitiendo transmitir la radiación infrarroja desde la superficie del pavimento hacia el agua en su interior, alcanzando esta una temperatura de 53°C bajo la condición de máxima irradiancia para la Ciudad de Concepción. Finalmente, esta investigación ha permitido concluir que las mezclas asfálticas con residuos metálicos podrían ser potencialmente utilizadas para el desarrollo de nuevos pavimentos asfálticos colectores capaces de absorber la radiación solar, almacenando ésta en el interior de la carretera.

Palabras claves: Mezclas asfálticas, Fibras de lana de acero, Virutas de acero, Propiedades térmicas, Radiación solar, Colector solar.

8764 + 12 Figuras/Tablas*250 + 3 Figura/Tabla* 500 = 13264 Palabras Totales.

THERMAL BEHAVIOUR OF ASPHALT PAVEMENTS REINFORCED WITH METALLIC WASTE: AN EVALUATION AS SOLAR COLLECTOR

Eric Aguilera Soto

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío
eraguile@alumnos.ubiobio.cl

Dr. José Norambuena Contreras

LabMAT, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío
jnorambuena@ubiobio.cl

Eng. José L. Concha Fuentealba

LabMAT, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío
jlconcha@ubiobio.cl

ABSTRACT

In this study, the influence of the type and content of two different metallic wastes on the thermal behaviour of asphalt mixtures and its use as a solar radiation absorbent material have been evaluated. With this purpose, nine different asphalt mixtures have been studied in laboratory conditions, using the same aggregates gradation and bitumen content but with two different types of metallic waste: steel shavings and steel wool fibres. Thus, different thermophysical properties (thermal conductivity, specific heat and thermal diffusivity) have been evaluated in specimens with and without metallic waste. In addition, the thermal behaviour of a solar collector prototype made of asphalt pavement with the addition of 4% of steel wool fibres was evaluated. This solar collector prototype was tested under the maximum irradiance conditions in the city of Concepcion, experimentally simulated using infrared radiation. The main results of the study showed that the heat transfer measured in the asphalt mixtures was more efficient in mixtures with steel wool fibres than in those with metallic shavings. Additionally, it was proven that the solar collector prototype presented good thermal behaviour, transmitting infrared radiation from the pavement surface to the water in its inside, and reaching a water temperature of 53°C under the maximum irradiance conditions in the city of Concepcion. Finally, this research concluded that asphalt mixtures with metallic waste can be potentially used to develop new asphalt pavements that act as solar collectors, absorbing and storing solar radiation.

Keywords: Asphalt mixture; Steel wool fibres; Steel shavings; Thermal properties; Solar radiation; Solar collector.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	8
1.1	ANTECEDENTES	8
1.2	HIPÓTESIS	10
1.3	OBJETIVOS	10
1.3.1	<i>Objetivos generales</i>	10
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i>	10
1.4	DECLARACIÓN DE AUTOR	10
2	MATERIALES Y MÉTODOS	11
2.1	MATERIALES	11
2.2	PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS DE ENSAYO	12
2.3	DENSIDAD APARENTE Y CONTENIDO DE HUECOS EN LAS PROBETAS DE ENSAYO	13
2.4	CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LOS RESIDUOS METÁLICOS	13
2.5	MEDIDA DE LAS PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE LAS MEZCLAS	14
2.6	ANÁLISIS DE LA IRRADIANCIA SOLAR PARA SIMULACIÓN EN LABORATORIO	16
2.7	DISPOSITIVO EXPERIMENTAL PARA LA SIMULACIÓN DE LA IRRADIANCIA SOLAR	17
2.8	MEDIDA DEL CALENTAMIENTO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS BAJO RADIACIÓN INFRARROJA	18
2.9	COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL PROTOTIPO DE COLECTOR SOLAR BAJO RADIACIÓN INFRARROJA	18
2.10	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	20
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
3.1	INFLUENCIA DE LOS RESIDUOS METÁLICOS EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS MEZCLAS	20

3.2	EFFECTO DE LOS RESIDUOS METÁLICOS EN LAS PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE LAS MEZCLAS	21
3.3	EFFECTO DE LOS RESIDUOS METÁLICOS EN LAS PROPIEDADES DE CALENTAMIENTO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS BAJO RADIACIÓN INFRARROJA	24
3.4	EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN PROTOTIPO DE COLECTOR SOLAR CALENTADO POR RADIACIÓN INFRARROJA	28
4	CONCLUSIONES	30
5	REFERENCIAS	32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Composición de la mezcla asfáltica reforzada con residuos metálicos.....	14
Tabla 2.	Parámetros de simulación usados en las mezclas asfálticas y colector solar asfáltico....	16
Tabla 3.	Resultados promedio de las propiedades termofísicas de mezclas con y sin residuos....	23
Tabla 4.	Variación de la temperatura superficial de calentamiento de las mezclas bajo condiciones de estado estacionario.....	26

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.	Imágenes ópticas (a-b) y SEM (c-d) de las fibras de lana de acero y virutas metálicas. ...	11
Fig. 2.	Histograma de longitudes de (a) fibras de lana de acero y (b) virutas de acero.....	12
Fig. 3.	(a) Controlador manual y sensor térmico, y (b) medición de la conductividad térmica. ...	15
Fig. 4.	(a) Medida del incremento de temperatura en régimen estacionario, (b) medida del incremento y pérdida de temperatura en régimen transitorio.	17
Fig. 5.	(a) Disposición de las termocuplas en la probeta de mezcla asfáltica, y (b) montaje experimental de la probeta de mezcla asfáltica calentada por radiación infrarroja.....	18
Fig. 6.	(a) Disposición de las termocuplas en el prototipo de colector solar asfáltico, y (b) montaje experimental del prototipo de colector solar calentado por radiación infrarroja.....	19
Fig. 7.	Resultados de (a) densidad aparente promedio y (b) contenido de huecos promedio en mezclas con y sin residuos metálicos.	21

Fig. 8. Evolución de la temperatura en estado estacionario en mezclas con: (a) fibras y (b) virutas.	24
Fig. 9. Imágenes termográficas en mezclas asfálticas con 4% de residuos metálicos para (a-b) 1 hora de calentamiento y (c-d) 12 horas de calentamiento por radiación infrarroja.	25
Fig. 10. Aumento y disminución de temperatura después de 1 h de calentamiento y enfriamiento.	27
Fig. 11. Evolución de la temperatura del colector solar asfáltico en estado transitorio simulando el mayor y menor valor de las máximas irradiancias en la ciudad de Concepción.	29

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La energía solar es una de las fuentes de energía no convencionales más adecuadas para reemplazar el uso de combustibles fósiles. Con este propósito, el desarrollo de nuevas tecnologías de colectores solares es un tema de interés entre los científicos. Sin embargo, el funcionamiento de los colectores solares depende de la radiación solar incidente y de la temperatura ambiente (Kalogirou S.A., 2013). Estudios recientes indican que países ubicados en América del Sur presentan uno de los niveles más altos de radiación solar en el mundo, con promedios de irradiancia global horizontal (GHI) sobre los 7 kWh/m² y una irradiancia directa normal (DNI) por encima de los 9-10 kWh/m² (Watts et al., 2015). Por lo tanto, en condiciones adecuadas, estos niveles de radiación pueden provocar que un pavimento asfáltico de una carretera alcance temperaturas de hasta los 60°C (Bijsterveld et al., 2001). Así, el calor absorbido por los pavimentos asfálticos puede ser utilizado con fines energéticos, convirtiendo al pavimento en un colector solar (Mallick et al., 2009; Bobes-Jesus et al., 2013).

La tecnología de colector solar en pavimentos asfálticos consiste en embeber tuberías en el interior del pavimento con un fluido que circula en su interior (Partl et al., 2014). Entre sus principales aplicaciones destacan: el confort térmico de los edificios adyacentes, su uso en sistemas de deshielo (Bijsterveld et al., 2001) y proporcionar electricidad para la iluminación de carreteras (Meiarashi & Ohara, 1997). Según Mallick et al., 2009 cuando un pavimento asfáltico es expuesto a radiación solar, una parte de esta radiación es absorbida, aumentando su temperatura superficial. De esta forma, el calor absorbido es transferido a las capas inferiores del pavimento, mediante conducción, aumentando la temperatura del agua contenida dentro de las tuberías. Sin embargo, para una mejor comprensión de los mecanismos de transferencia de calor en los pavimentos, es necesario evaluar las propiedades termofísicas y de calentamiento de la mezcla asfáltica.

En este contexto, Hassn et al., 2016a plantean que la temperatura máxima alcanzada por la superficie del pavimento está dada por la transferencia de calor por convección con el aire del ambiente, y la transferencia de calor por conducción con las capas del pavimento. Sin embargo, las propiedades de calentamiento de los pavimentos también dependen en gran medida de otras variables como son el contenido de huecos de aire (Hassn et al., 2016b) y la distribución y tipo de aditivo metálico añadido a la mezcla asfáltica (Norambuena-Contreras et al., 2016). En términos

prácticos, un pavimento asfáltico puede ser un buen absorbente de radiación solar dado su color negro (Bobes-Jesus et al., 2013), pudiendo presentar altos niveles de absorptividad sin necesidad de recubrimientos. Sin embargo, una desventaja de los pavimentos asfálticos es su alta emisividad (Bobes-Jesus et al., 2013), la que puede generar pérdidas significativas de calor al ambiente, reduciendo la eficiencia del colector solar asfáltico. Por lo tanto, la adición de residuos metálicos puede mejorar la transferencia de calor en un pavimento asfáltico, contrarrestando su alto índice de emisividad. En este sentido, estudios previos han demostrado que la incorporación de fibras metálicas en un pavimento asfáltico puede mejorar la conductividad térmica (Hassn et al., 2016b; Norambuena-Contreras et al., 2016). En consecuencia, una mayor cantidad de energía transferida desde zonas de alta hacia baja energía térmica puede incrementar la temperatura del fluido calor-transportador de un colector solar asfáltico. Otro factor a considerar es el almacenamiento de calor en el material absorbente de radiación solar y asociado al equilibrio termodinámico del sistema, donde es posible evaluar propiedades como densidad y calor específico (Hassn et al., 2016b).

En este contexto, se ha demostrado que la incorporación de residuos metálicos aumenta las tasas de calentamiento en las mezclas asfálticas, absorbiendo más energía térmica que otros componentes de la mezcla como los áridos o el cemento asfáltico (Norambuena-Contreras & Concha, 2016). Por lo tanto, la adición de residuos metálicos puede mejorar la eficiencia de un colector solar asfáltico, de acuerdo a Wu et al., 2009. Adicionalmente, el uso de esta nueva mezcla asfáltica puede reducir la temperatura superficial de los pavimentos, disminuyendo el efecto isla de calor urbano producido por la radiación térmica emitida por los pavimentos (Norambuena-Contreras & Concha, 2016). Finalmente, la incorporación de residuos metálicos tales como fibras o virutas en colectores solares asfálticos mejora su disposición final, disminuyendo la contaminación al medioambiente. Sin embargo, no se conoce tan bien el comportamiento térmico de este nuevo pavimento con residuos metálicos cuando está expuesto a radiación solar.

Por todas estas razones, en esta investigación se ha evaluado la influencia del tipo y contenido de residuos metálicos sobre el comportamiento térmico de mezclas asfálticas y su utilización como material absorbente de radiación solar. Con este propósito, se han evaluado propiedades termofísicas de diferentes mezclas asfálticas reforzadas con fibras y virutas metálicas, y su comportamiento térmico como material absorbente bajo simulación de radiación solar en un prototipo de colector solar asfáltico en condiciones de laboratorio.

1.2 Hipótesis

- Una mezcla asfáltica con residuos metálicos puede presentar ventajas en las propiedades termo-físicas frente a una mezcla asfáltica sin residuos metálicos.
- La radiación solar en pavimentos puede ser simulada en condiciones de laboratorio usando radiación infrarroja sobre muestras de mezcla asfáltica con y sin adición de residuos metálicos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos generales

- Evaluar la influencia del tipo y contenido de residuo metálico en el comportamiento térmico de mezclas asfálticas.
- Evaluar el comportamiento térmico de un prototipo de colector solar fabricado a partir de una mezcla asfáltica con adición de residuos metálicos.

1.3.2 Objetivos específicos

- Medir las propiedades morfológicas de los diferentes residuos metálicos usando microscopía óptica y electrónica de barrido.
- Determinar la densidad y porosidad de las mezclas con y sin adición de residuos metálicos.
- Medir la conductividad térmica, calor específico y difusividad térmica de mezclas asfálticas con y sin adición de residuos metálicos bajo condiciones transitorias.
- Evaluar el comportamiento térmico por radiación infrarroja de las mezclas asfálticas con y sin adición de residuos metálicos bajo condiciones estacionarias y transitorias.
- Definir un contenido óptimo de residuos metálicos en una mezcla asfáltica para el diseño de un prototipo de colector solar asfáltico.
- Evaluar el comportamiento térmico por radiación infrarroja de un prototipo de colector solar asfáltico usando una mezcla asfáltica con adición de residuos metálicos.
- Realizar un análisis comparativo entre las variables medidas.

1.4 Declaración de autor

Parte de la redacción de esta Tesis ha sido extraída de la publicación “*Norambuena-Contreras J, Concha JL, Borinaga-Treviño R. Thermal evaluation of a sustainable solar collector made of recycled rubber membranes from End of Life Tyres*”. Submitted in January 2017 to *Journal of Cleaner Production, Elsevier*”

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

En este estudio se ha utilizado una mezcla asfáltica semi-densa tipo IV-A-12. La composición de la mezcla asfáltica se muestra en la Tabla 1. Los áridos se han clasificado en tres categorías: árido grueso (5-12.5 mm y densidad 2.779 g/cm^3), árido fino (0.08-5mm y densidad 2.721 g/cm^3) y filler ($<0.08 \text{ mm}$ y densidad 2.813 g/cm^3). El cemento asfáltico usado fue un CA-24 con una densidad 1.039 g/cm^3 . Además, se han adicionado dos diferentes tipos de residuos metálicos a las mezclas cortadas mecánicamente: fibras de lana de acero (Fig. 1(a)) y virutas de acero (Fig. 1(b)). El material utilizado para las fibras fue acero de bajo contenido en carbono, con una densidad de 7.180 g/cm^3 . Estas fibras tienen un diámetro promedio de 0.157 mm (Fig. 1(c)) con una relación de aspecto promedio de 30 y una longitud inicial en el rango de 2-8 mm (ver Fig. 2(a)), lo que significa que tanto fibras cortas como largas fueron adicionadas a la matriz de la mezcla asfáltica.

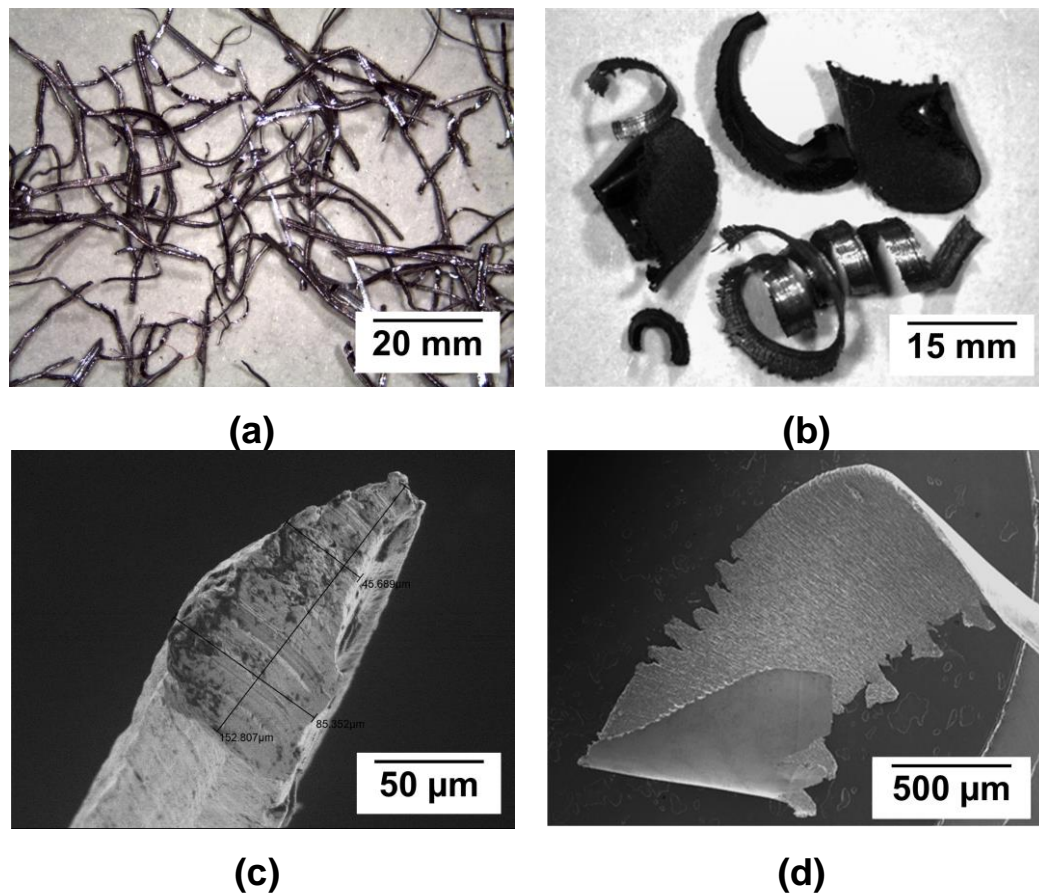


Fig. 1. Imágenes ópticas (a-b) y SEM (c-d) de las fibras de lana de acero y virutas metálicas.

Por otra parte, el material usado en las virutas fue acero inoxidable austenítico, con una densidad de 7.980 g/cm^3 . Estas virutas tienen un espesor promedio de 0.335 mm (Fig. 1 (d)) y una longitud

inicial en el rango de 1-6 mm (ver Fig. 2(b)). Finalmente, se utilizaron 4 porcentajes diferentes de fibras y virutas en las mezclas: 2%, 4%, 6% y 8%, por volumen total de cemento asfáltico, ver Tabla 1. En total se prepararon 9 diferentes tipos de mezclas asfálticas: 1 mezcla asfáltica de referencia sin residuos metálicos, 4 mezclas asfálticas con diferentes contenidos de fibras y 4 mezclas asfálticas con diferentes contenidos de virutas, empleando la misma granulometría y contenido de cemento asfáltico en la mezcla, pero cambiando la masa de los residuos metálicos adicionados en la mezcla.

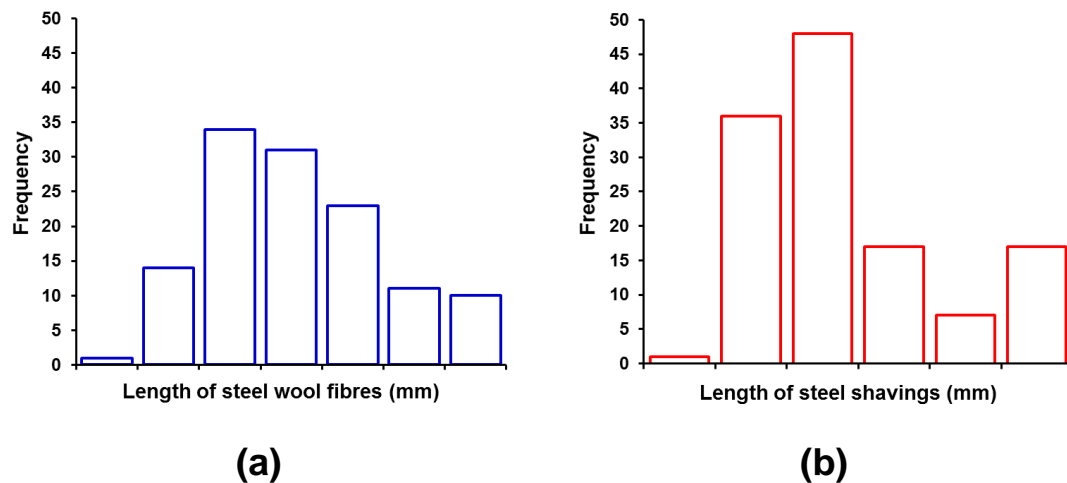


Fig. 2. Histograma de longitudes de (a) fibras de lana de acero y (b) virutas de acero.

2.2 Preparación de las probetas de ensayo

Para la fabricación de las probetas de ensayo, los materiales fueron mezclados manualmente dentro de un recipiente metálico a una velocidad constante de 100 r.p.m. Previo al proceso de mezclado, los áridos fueron calentados a una temperatura de 150°C durante 24 horas, mientras que el cemento asfáltico y los residuos metálicos se calentaron a una temperatura de 150°C durante 2 horas. De este modo, los materiales fueron vertidos al recipiente en el siguiente orden: primero, el cemento asfáltico y los residuos metálicos (fibras o virutas); segundo, el árido grueso; tercero, el árido fino y finalmente, el filler. Los materiales fueron mezclados durante un tiempo aproximado de 3.5 minutos, siempre conservando una temperatura de mezclado constante de 150°C en el interior del recipiente. Una vez mezclados los materiales y garantizando una buena distribución de los residuos metálicos, éstos fueron dispuestos en el interior de un molde Marshall, previamente calentado, de aproximadamente 10 cm de diámetro y 6 cm de altura, con el objetivo de compactar las mezclas mediante un martillo Marshall aplicando 75 golpes por cada cara de la muestra. Después de la compactación y posterior enfriamiento de 24 horas a temperatura ambiente, las probetas Marshall

fueron extraídas mecánicamente desde el interior del molde. Finalmente, para este estudio se fabricaron un total de 36 probetas Marshall: 32 con fibras y virutas y 4 de referencia sin adición de residuos.

2.3 Densidad aparente y contenido de huecos en las probetas de ensayo

Con el objetivo de analizar la influencia de las propiedades físicas en las propiedades térmicas de las mezclas asfálticas, se ha determinado la densidad aparente y el contenido de huecos de todas las probetas de ensayo. La densidad aparente se ha calculado como la relación entre la masa en seco y el volumen real de cada probeta. Para ello, en cada probeta de ensayo se ha medido la masa en seco y el volumen real incluyendo huecos, dato obtenido a partir de la masa sumergida en agua. Por otra parte, el contenido de huecos de cada mezcla ha sido determinado a partir del cálculo previo de la densidad aparente. Por lo tanto, como el porcentaje exacto de los materiales y su densidad son conocidos para cada tipo de mezcla, se ha calculado la densidad máxima teórica sin huecos para cada tipo de mezcla. De este modo, el contenido de huecos de la mezcla (CH), queda expresado de acuerdo a la ecuación (1).

$$CH(\%) = \frac{\rho_{mt} - \rho_a}{\rho_{mt}} \quad (1)$$

Donde ρ_a es la densidad aparente de cada mezcla, medida en g/cm^3 y ρ_{mt} es la densidad máxima teórica sin huecos de cada probeta de ensayo, medida en g/cm^3 . Finalmente, la densidad aparente y el contenido de huecos de cada mezcla han sido calculados como el valor promedio de 3 valores por cada porcentaje de residuo metálico.

2.4 Caracterización morfológica de los residuos metálicos

Para determinar la longitud de los residuos metálicos, se han seleccionado 120 fibras y virutas de acero de manera aleatoria del total de residuos disponibles para la fabricación de las mezclas asfálticas. La longitud de éstas ha sido determinada a través de imágenes realizadas usando un microscopio óptico Leica EZ4 con 35x de magnificación (ver Fig. 1(a) y (b)). Posteriormente, se ha determinado la longitud de cada uno de los residuos metálicos mediante el programa de procesamiento de imagen ImageJ®. El programa consideró que 148 píxeles equivalen a una longitud de 1 mm. La longitud de las fibras y virutas han sido representadas en histogramas de frecuencias con el objetivo de comparar la distribución de sus longitudes (ver Fig. 2). Por otra parte, el diámetro y espesor promedio de las fibras de lana y virutas de acero se han calculado como el valor promedio de 20 residuos metálicos usando un micrómetro digital calibrado, realizando tres

medidas de repetición por cada uno de los residuos. Finalmente, el aspecto superficial y la morfología de las fibras y virutas individuales han sido analizadas mediante imágenes SEM obtenidas usando un Microscopio Electrónico de Barrido JEOL JSM-6610/LV.

Tabla 1. Composición de la mezcla asfáltica reforzada con residuos metálicos.

Sieve size (mm)	Aggregate mass % retained	Cumulative aggregate mass % retained		Mass (g)		
12.5	16	16		176		
10	13	29		143		
5	24	53		264		
2.5	16	69		176		
0.63	17	86		187		
0.315	4	90		44		
0.16	3	93		33		
0.08	2	95		19		
<0.08	5	100		58		
Bitumen CA-24	(% of mass/ aggregates)	5.3		58.3		
Fibres and shavings (% of vol./Bitumen)	Length range of fibres (mm)	Length range of shavings (mm)	Average diameter of fibres (mm)	Average thickness of shavings (mm)	Mass of fibres (g)	Mass of shavings (g)
2% fibres					8	9
4% fibres	2-8	1-6	0.157	0.335	16	18
6% fibres					24	27
8% fibres					32	36

2.5 Medida de las propiedades termofísicas de las mezclas

Con el objetivo de evaluar la influencia del tipo y contenido de residuo metálico en la capacidad de transferencia de calor de las mezclas asfálticas, se ha medido la conductividad térmica de todas las mezclas con y sin adición de residuos metálicos usando el método de la aguja térmica, basado en la teoría de la fuente lineal de calor transitorio (ASTM D 5334, 2008). Para ello, se ha utilizado el analizador de propiedades térmicas KD2-Pro (Decagon Devices Inc.). Este equipo consta de un controlador manual y un sensor térmico (ver Fig. 3(a)). En este estudio, se ha utilizado un sensor térmico compuesto por una sonda de acero inoxidable de 3.9 mm de diámetro y 60 mm de longitud (sensor RK-1), con un rango de medición de 0.1 a 6.0 Wm⁻¹K⁻¹. Este sensor incorpora un calentador y una termocupla en su interior. Para realizar el ensayo de conductividad térmica, primero, se ha

recubierto el sensor térmico con un gel térmico polisintético, reduciendo la presencia de huecos de aire y los efectos de resistencia de contacto con la superficie interna de la muestra de ensayo. Luego, el sensor fue embebido en la probeta de ensayo previamente perforada. Además, con el objetivo de proporcionar unas condiciones adiabáticas durante la medición, la probeta ensayada se dispuso sobre otras dos probetas con el mismo contenido de residuo metálico, asegurando así la altura mínima requerida por el sensor (ver Fig. 3(b)). La duración de cada ensayo fue de 10 min, donde se determinó el perfil de calentamiento y enfriamiento de cada probeta en condiciones transitorias.



Fig. 3. (a) Controlador manual y sensor térmico, y (b) medición de la conductividad térmica.

Adicionalmente, se ha calculado la capacidad calorífica específica y la difusividad térmica de todas las probetas de ensayo. La capacidad calorífica específica de cada mezcla (C_p) fue interpretada como la energía por unidad de masa necesaria para aumentar la temperatura de la mezcla asfáltica en 1°C en $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$. Esta variable ha sido calculada según la ecuación (2).

$$C_p = \frac{1}{m_{Total}} [m_{Ag} * C_{Ag} + m_M * C_M + m_{M.W} * C_{M.W}] \quad (2)$$

Donde, m_{Total} es la masa total de cada mezcla asfáltica en kg, C_{Ag} y m_{Ag} son la capacidad calorífica específica en $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ y la masa de los áridos en kg, C_M y m_M son la capacidad calorífica específica en $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ y la masa en kg del cemento asfáltico, y $C_{M.W}$ y $m_{M.W}$ son la capacidad calorífica específica en $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ y la masa de los residuos metálicos en kg, según corresponda: C_f para fibras y C_s para virutas. Los valores de capacidad calorífica específica de cada componente de la mezcla fueron obtenidos de la literatura. De esta forma, C_{Ag} (Hassn et al., 2016b), C_M , C_f

(Norambuena-Contreras & García, 2016) y C_s (CTE, 2010), se han establecido en $908 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$, $1900 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$, $482 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ y $450 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$, respectivamente.

Por otra parte, la difusividad térmica de cada probeta de ensayo (β) fue interpretada como la velocidad en m^2/s a la que se transmite la energía calórica a través de la mezcla asfáltica, desde zonas de mayor temperatura a zonas con menor temperatura, hasta lograr un equilibrio térmico. Esta variable ha sido calculada según la ecuación (3).

$$\beta = \frac{\lambda}{\rho_a * C_p} \quad (3)$$

Donde λ es la conductividad térmica de la mezcla en $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, ρ_a es la densidad aparente de cada mezcla en g/cm^3 y C_p es la capacidad calorífica específica de cada probeta de ensayo en $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$.

2.6 Análisis de la irradiancia solar para simulación en laboratorio

Un conocimiento de la radiación solar local es esencial para un diseño apropiado de los sistemas de recolección de energía solar (Wong & Chow, 2001). Con el fin de simular en condiciones de laboratorio diferentes valores de radiación solar en las mezclas asfálticas y en el prototipo de colector solar, se analizaron los datos de irradiancia solar para un año promedio de la ciudad de Concepción (Chile). Con este propósito, los valores promedio de irradiancia solar diaria entre los años 2001 y 2013 fueron analizados estadísticamente. Todos los datos fueron extraídos del mapa solar de la Universidad de Chile. A partir de este análisis, se concluyó que el mes de diciembre (temporada de verano) presentó las condiciones más favorables de irradiancia solar, con un valor promedio máximo diario de 899 W/m^2 entre las 12:00 y 13:00 p.m. Además, se encontró que el mes de junio (temporada de invierno) presentó las condiciones más desfavorables de irradiancia solar, con un valor promedio máximo diario de 289 W/m^2 entre las 12:00 y 13:00 p.m.

Tabla 2. Parámetros de simulación usados en las mezclas asfálticas y colector solar asfáltico.

Month	Time period	Solar irradiance (W/m^2)	Height (m)
June	12:00 – 13:00	289.38	0.900
December	12:00 – 13:00	898.57	0.414

Adicionalmente, con el objetivo de simular la irradiancia solar en condiciones de laboratorio, los datos de máxima y mínima irradiancia solar fueron ingresados al modelo de irradiancia publicado por Norambuena-Contreras et al., 2017. Este modelo, conocido un valor de irradiación solar,

permite estimar una altura de simulación de flujo de radiación infrarroja, simulado usando una lámpara infrarroja de potencia 250W. De este modo, las alturas de simulación correspondientes a cada valor de irradiación se muestran en la Tabla 2. Finalmente, las propiedades de calentamiento de las probetas de mezcla asfáltica fueron evaluadas bajo la condición de máxima irradiancia solar, midiendo el incremento de temperatura en régimen estacionario ver Fig. 4(a), e incremento y pérdida de temperatura en régimen transitorio, ver Fig. 4(b). Mientras que las propiedades de calentamiento del colector solar asfáltico se midieron bajo condiciones de máxima y mínima irradiancia, midiendo solo el incremento y pérdida de temperatura en régimen transitorio Fig. 4(b).

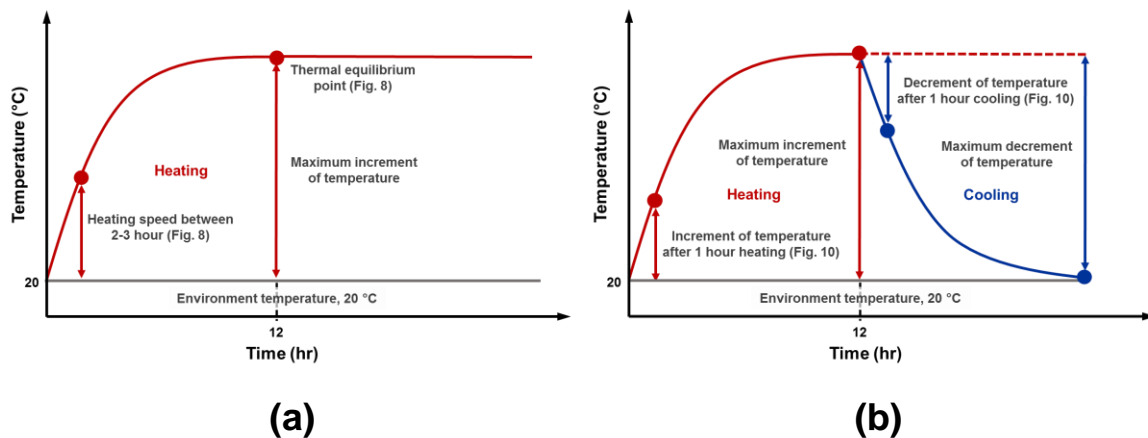


Fig. 4. (a) Medida del incremento de temperatura en régimen estacionario, (b) medida del incremento y pérdida de temperatura en régimen transitorio.

2.7 Dispositivo experimental para la simulación de la irradiancia solar

La Fig. 5(b) muestra el dispositivo experimental fabricado para la simulación experimental de la irradiancia solar. Este dispositivo ha sido fabricado siguiendo las recomendaciones de Norambuena-Contreras et al., 2017. De este modo, para medir las propiedades de calentamiento en las probetas de mezcla asfáltica y prototipo de colector solar asfáltico, se construyó una cámara de ensayos con dimensiones de 35x35x100cm. En el interior de esta cámara se dispuso como fuente de calor una lámpara infrarroja con una potencia de 250W y altura regulable entre 20 y 100cm, ver Fig. 5(b). Además, para evitar la dispersión de la radiación infrarroja y generar unas condiciones adiabáticas de ensayo, en las paredes de la cámara se dispusieron tres paneles aislantes con dimensiones 35x100cm. Finalmente, con el objetivo de proporcionar un aislamiento térmico a las probetas asfálticas y prototipo de colector dentro de la cámara de ensayo, todas las probetas y prototipo de colector solar fueron ensayadas en el interior de un recipiente prismático de 30x30x10cm con arena sanitaria de color blanco, simulando un semi-espacio térmico confinado.

2.8 Medida del calentamiento de las mezclas asfálticas bajo radiación infrarroja

Con el objetivo de evaluar el efecto de los residuos metálicos en la distribución de la temperatura superficial e interna de las mezclas asfálticas bajo calentamiento por radiación, 9 diferentes mezclas asfálticas con y sin residuos metálicos fueron expuestas a una fuente de radiación infrarroja, midiendo el incremento y pérdida de temperatura en función del tiempo, ver Fig. 4. Para esto, se midió la variación de la temperatura en la superficie y el interior de todas las probetas en condiciones estacionarias y transitorias, según el montaje experimental de la sección 2.7. La distribución superficial de la temperatura en las probetas fue registrada mediante una cámara infrarroja a color Optris PI160 de 160x120 píxeles, ver Fig. 5(b). Además, la variación de la temperatura en el interior de las probetas fue medida a través de 3 termocuplas tipo K dispuestas a lo largo de la probeta (superficie, parte interna y parte inferior), como se muestra en la Fig. 5(a). Todas las termocuplas fueron ubicadas en el centro geométrico de las probetas. De esta forma, la temperatura en condiciones de estado estacionario fue medida durante 24 horas, mientras que la evaluación en estado transitorio fue medida durante 12 horas de calentamiento y 12 horas de enfriamiento, simulando un ciclo día-noche. Finalmente, todas las mediciones fueron realizadas a una altura de 414 mm entre la probeta y el foco de radiación infrarroja, simulando el máximo nivel de irradiancia del mes de diciembre para la ciudad de Concepción, ver Tabla 2.

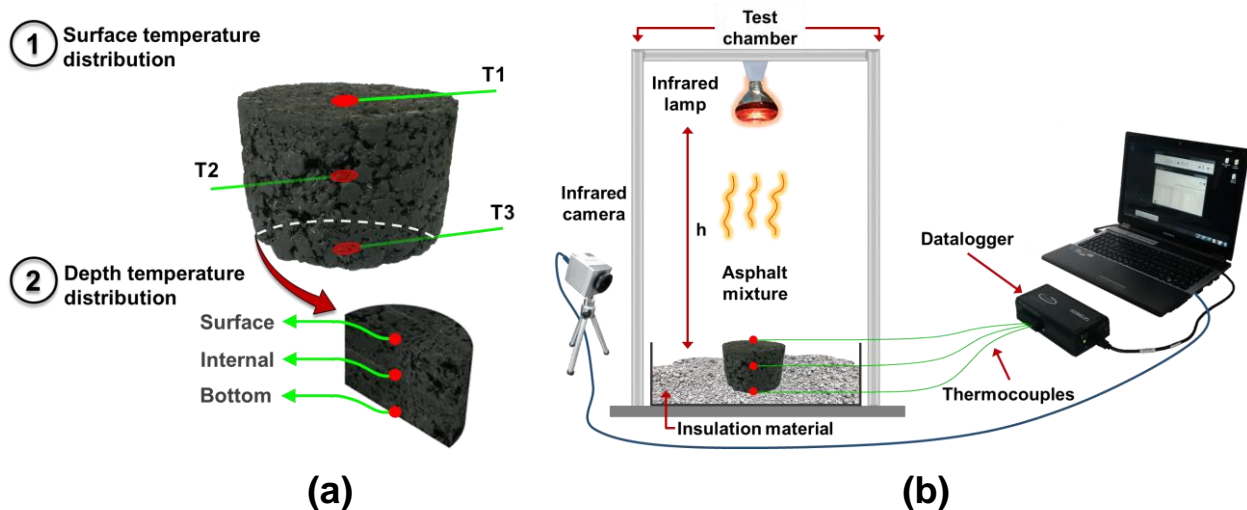


Fig. 5. (a) Disposición de las termocuplas en la probeta de mezcla asfáltica, y (b) montaje experimental de la probeta de mezcla asfáltica calentada por radiación infrarroja.

2.9 Comportamiento térmico del prototipo de colector solar bajo radiación infrarroja

Con el fin de proponer un sistema de energía solar sustentable y de bajo costo, en este estudio se ha propuesto el diseño de un prototipo de colector solar asfáltico con adición de residuos metálico,

ver Fig. 6. Este prototipo de colector sustentable ha sido evaluado térmicamente en condiciones experimentales, de acuerdo al montaje propuesto en la sección 2.7. Para su ensayo, primero, se seleccionó una probeta de mezcla asfáltica tipo Marshall la cual fue perforada lateralmente a lo largo de todo su diámetro (100mm), el diámetro de la perforación fue de aproximadamente 12mm. Luego, en el interior de la perforación, se dispuso una tubería de cobre de 11mm de diámetro y 140mm de longitud conectada en sus extremos a dos tuberías tipo L de 11mm de diámetro y 3.5cm de largo, alcanzando una capacidad de almacenamiento de agua de 20 cm^3 , ver Fig. 6(a). Con el objetivo de evitar pérdidas de calor por convección, el espacio existente entre la tubería y la perforación en la muestra Marshall fue sellado con una pasta térmica polisintética. Para evaluar el comportamiento térmico del nuevo prototipo de colector solar, se midió la variación en régimen transitorio de la temperatura en la superficie, en el interior y en la parte inferior del colector. De este modo, la temperatura superficial en el colector se registró usando una termocupla tipo K y una cámara infrarroja a color Optris PI160 de 160x120 píxeles, ver Fig. 6(b).

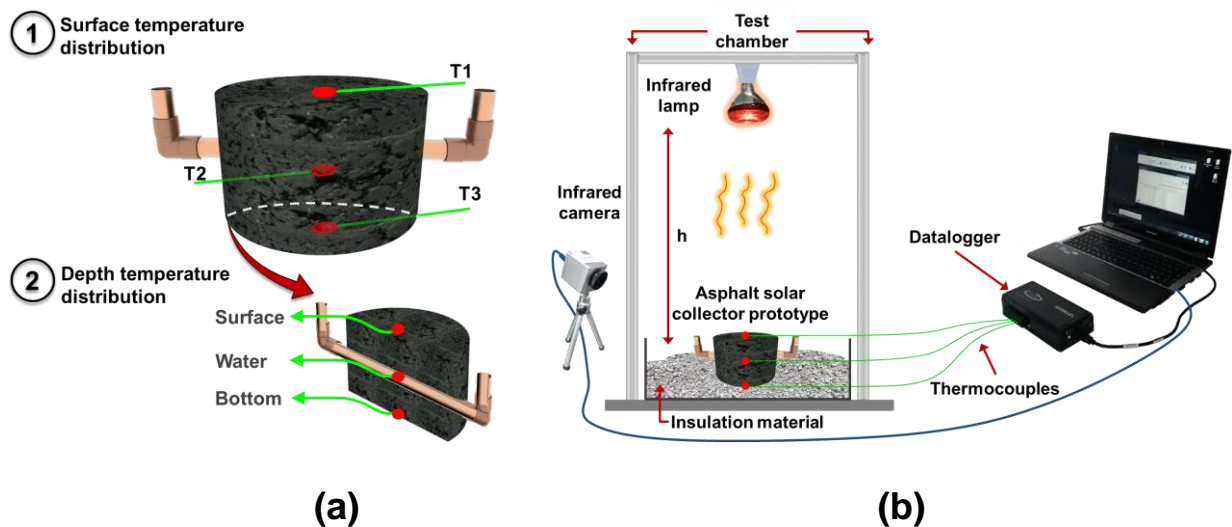


Fig. 6. (a) Disposición de las termocuplas en el prototipo de colector solar asfáltico, y (b) montaje experimental del prototipo de colector solar calentado por radiación infrarroja.

Por otra parte, la temperatura del agua dentro de la tubería de cobre se registró a través de una segunda termocupla tipo K. Adicionalmente, se instaló una tercera termocupla tipo K en la base del prototipo de colector solar asfáltico. Todas las termocuplas fueron instaladas en el centro geométrico del prototipo de colector, ver Fig. 6(a). La temperatura del colector se midió durante 12 horas de calentamiento y 12 horas de enfriamiento, como se muestra en la Fig. 4, simulando un ciclo día-noche. Finalmente, todas las mediciones fueron realizadas considerando dos alturas

(414mm y 900mm) entre la superficie del colector y el foco de radiación infrarroja, simulando el mínimo y máximo nivel de irradiancia para la ciudad de Concepción, ver Tabla 2.

2.10 Sistema de adquisición de datos

En todos los ensayos sobre las mezclas asfálticas y el prototipo de colector solar, las termocuplas tipo K fueron conectadas a un sistema de adquisición de datos portátil OMEGA OMB DAQ-54, donde cada dato de temperatura para los perfiles de medida fue registrado a intervalos de 10 min. Finalmente, todos los perfiles de temperatura fueron registrados a una temperatura ambiente constante de aproximadamente 20°C controlada por un termómetro electrónico portátil.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Influencia de los residuos metálicos en las propiedades físicas de las mezclas

En la Fig. 7 se muestran los resultados promedio de las densidades aparentes y contenido de huecos de las mezclas asfálticas con y sin adición de residuos metálicos. De esta forma, la Fig. 7(a) muestra que la densidad aparente promedio de las mezclas asfálticas con residuos metálicos fue menor en comparación a una mezcla de referencia. Adicionalmente, la disminución de la densidad aparente incrementó con la adición de residuo metálico. De este modo, el valor máximo de densidad aparente promedio fue de 2.356 g/cm³, para la mezcla de referencia sin residuo metálico. Por otra parte, las mezclas con contenidos de residuos metálicos de 2%, 4%, 6% y 8% presentaron valores de densidad aparente promedio de: 2.362 g/cm³, 2.338 g/cm³, 2.316 g/cm³ y 2.285 g/cm³ para virutas y 2.347 g/cm³, 2.313 g/cm³, 2.342 g/cm³ y 2.310 g/cm³ para fibras de lana de acero, respectivamente. En general, la disminución de la densidad en las mezclas con residuos metálicos se debe a que el volumen y la masa de las mezclas varían al adicionar residuos metálicos. Sin embargo, la disminución de la densidad aparente entre mezclas asfálticas con igual tipo de residuo metálico se produce principalmente por la variación del volumen total de cada mezcla más que a la variación de su masa. Para justificar lo anterior, la Fig. 7(b) muestra que las mezclas asfálticas con adición de residuos metálicos aumentaron el contenido de huecos promedio en relación a una mezcla sin residuos metálicos. De esta forma, el menor contenido de huecos fue registrado en la mezcla de referencia, con un valor de 5.83%. Por otra parte, mezclas con un contenido de 2%, 4%, 6% y 8% de residuo metálico presentaron mayores valores promedio de contenido de huecos: 6.86%, 9.05%, 8.24% y 10.21% para fibras de lana de acero y 6.26%, 8.05%, 9.27% y 11.22% para virutas, respectivamente. El aumento en los huecos de aire con la adición de residuos metálicos se

debe a que la superficie específica total de las mezclas con residuos fue mayor en comparación a una mezcla sin residuo metálico. Adicionalmente, la Fig. 7(b) muestra que en mezclas con 2% y 4% de residuo metálico, las virutas generaron menores contenidos de huecos de aire que las fibras metálicas. Sin embargo, en mezclas con 6% y 8% de residuo metálico, el contenido de huecos de aire fue mayor en mezclas con virutas metálicas que en mezclas con fibras de lana de acero. Una hipótesis para esto, puede deberse a que las virutas metálicas redujeron su tamaño debido a la fractura (trituration mecánica) producida durante los procesos de mezclado y compactación, disminuyendo su capacidad de formar clústers en el interior de la mezcla, reduciendo la probabilidad de formación de huecos de aire en la mezcla.

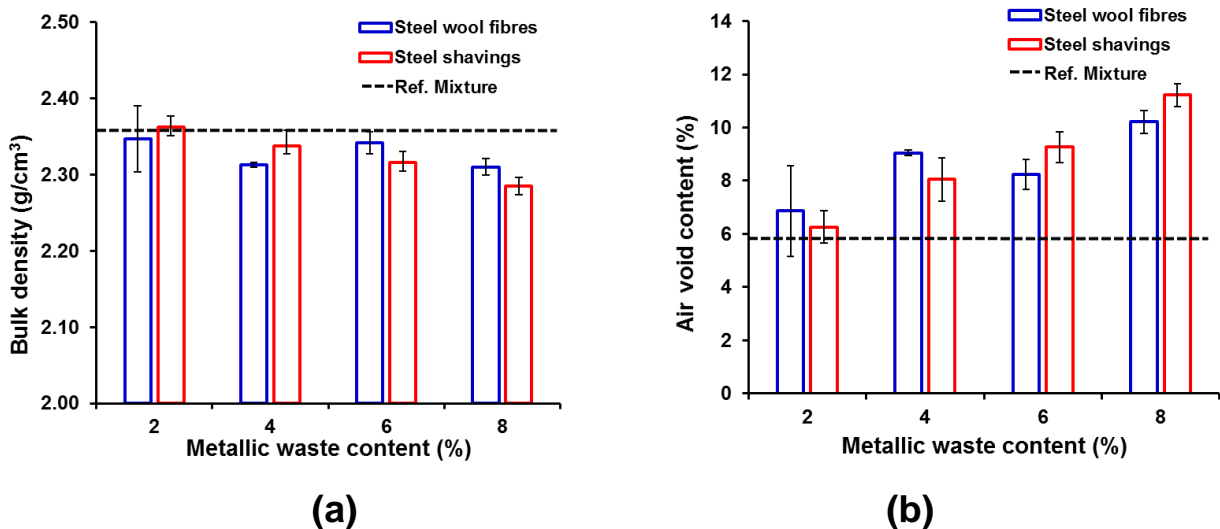


Fig. 7. Resultados de (a) densidad aparente promedio y (b) contenido de huecos promedio en mezclas con y sin residuos metálicos.

3.2 Efecto de los residuos metálicos en las propiedades termofísicas de las mezclas

En la Tabla 3 se muestran los resultados promedio de todas las propiedades termofísicas evaluadas en las mezclas asfálticas con diferente tipo y contenido de residuo metálico. En particular, la cantidad de energía transportada desde zonas de alta temperatura a zonas de baja temperatura, es función de la conductividad térmica. De esta forma, es posible observar que la conductividad térmica se redujo desde $1.406 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ para una mezcla de referencia, hasta $1.343 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ y $1.187 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ para una mezcla con 8% de fibras de lana de acero y virutas metálicas, respectivamente. Esto significa que las mezclas con adición de residuos metálicos transfirieron una menor cantidad de calor hacia zonas de baja temperatura. Lo anterior pudo ser debido al aumento en el contenido de huecos de aire con el incremento de residuo metálico adicionado, provocando una mayor disipación de calor, ver Fig. 7(b). Por otra parte, las mezclas con adición de fibras de lana de acero

presentaron mayores valores promedio de conductividad térmica en comparación a las mezclas con virutas de acero, para todos los contenidos evaluados (ver Tabla 3). Esto se debe principalmente a la morfología los residuos metálicos (ver Fig. 1) y al hecho de que estos residuos pueden ser considerados como unidades de calentamiento que facilitan la transmisión de calor en el interior de la mezcla asfáltica. De esta forma, las virutas pueden considerarse partículas metálicas (ver Fig. 1(d)) presentaron un mayor grado de dispersión en la matriz asfáltica. Por lo tanto, la transmisión de calor hacia zonas de baja energía térmica a través de ellas no fue efectiva. Por el contrario, las fibras de lana de acero, efecto de su alta relación de aspecto (ver Fig. 1 y Fig. 2) generaron un mayor número de contactos entre ellas, transmitiendo efectivamente el calor hacia zonas de baja energía térmica. De esta forma, la máxima conductividad térmica de una mezcla con adición de residuos metálicos fue $1.385 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ para una probeta con 4% de fibras de lana de acero, lo que representa una disminución de un 1.5% en relación a una mezcla de referencia. Otra razón que puede explicar la diferencia entre conductividades térmicas para probetas con fibras y virutas es la conductividad térmica de cada residuo metálico. De esta forma, el acero austenítico de las virutas tiene una conductividad térmica menor que el acero de bajo contenido en carbono de las fibras de lana de acero (Chagas et al., 2013). Por otra parte, la temperatura que las mezclas pueden alcanzar incrementos debido al calor absorbido, dependiendo del calor específico. La Tabla 3 muestra los valores promedio de calor específico de cada mezcla obtenidos de acuerdo a la Ecuación 2. En esta Tabla se observa que el calor específico se redujo desde 957.93 J/kgK para una probeta de referencia, hasta 945.13 J/kgK y 942.62 J/kgK para una probeta con 8% de fibras de lana de acero y virutas metálicas, respectivamente. Esto significa una reducción en la cantidad de energía para incrementar la temperatura de las probetas en hasta un 1.3% y un 1.6%, respectivamente. Esta diferencia se debe a que las virutas poseen una densidad mayor en comparación a las fibras de lana de acero. De esta forma, mientras mayor fue la adición de residuo metálico en las probetas, mayor fue la masa total utilizada en la Ecuación 2. Sin embargo, la diferencia en la masa total de las probetas con virutas y fibras metálicas no afectó significativamente a esta propiedad. Adicionalmente, la velocidad a la que el calor es transferido a través de la muestra fue evaluada mediante la difusividad térmica. En la Tabla 3 se observa que la adición de fibras de lana de acero, en general, incrementó la difusividad térmica de las mezclas asfálticas respecto de una mezcla de referencia. Este incremento fue para mezclas con más de un 4% de contenido de fibras. En particular, un 4% de adición fibras de lana de acero presentó la mayor difusividad térmica con un valor de $6.293 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, mientras que las mezclas con un 8% y 6% de fibra de lana de acero

presentaron una difusividad térmica menor con valores de $6.270 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y $6.209 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, respectivamente. Este resultado se debe a que la mezcla con 4% de fibras metálicas tuvo una mayor disminución de la densidad y calor específico en comparación a la reducción de la conductividad térmica de las mezclas, de acuerdo a la Ecuación 3. Por otra parte, la adición de virutas disminuyó la difusividad térmica de las mezclas asfálticas para todos los contenidos evaluados, comparado con una mezcla de referencia sin virutas. Lo anterior fue debido a un aumento significativo de los huecos de aire.

En base a la discusión anterior es posible concluir que la adición de residuos metálicos en las mezclas redujo la conductividad térmica, disminuyendo la cantidad de energía transportada a zonas de baja energía. Por otra parte, la adición de residuos metálicos redujo ligeramente la cantidad de energía necesaria para aumentar la temperatura de las mezclas, hasta en un 1.3% y un 1.6% para un 8% de fibras y virutas metálicas, respectivamente. Finalmente, las fibras de lana de acero, en general, incrementaron la difusividad térmica de las mezclas, mientras que las virutas de acero disminuyeron la difusividad térmica de la mezcla asfáltica, en relación a una mezcla sin residuos. Por lo tanto, una mezcla asfáltica con adición de fibras de lana de acero puede ser utilizada para el desarrollo de un nuevo prototipo de colector solar asfáltico. En particular, una mezcla asfáltica con un 4% de fibras de lana de acero puede actuar efectivamente como material conductor de calor en un colector solar asfáltico dada su alta conductividad y difusividad térmica, reduciendo la energía necesaria para incrementar su temperatura. Sin embargo, para la elección del material absorbente de radiación solar del colector solar asfáltico también es necesario analizar las propiedades de calentamiento de las mezclas bajo calentamiento por radiación, discutida en la siguiente sección.

Tabla 3. Resultados promedio de las propiedades termofísicas de mezclas con y sin residuos.

Metallic waste content	Steel wool fibres			Steel shavings		
	Thermal conductivity (W/mK)	Specific heat capacity (J/kgK)	Thermal diffusivity γ ($\times 10^{-7}$) (m^2/s)	Thermal conductivity (W/mK)	Specific heat capacity (J/kgK)	Thermal diffusivity ($\times 10^{-7}$) (m^2/s)
2%	1.343	954.67	5.994	1.187	954.01	5.268
4%	1.385	951.45	6.293	1.246	950.16	5.609
6%	1.379	948.27	6.209	1.257	946.36	5.735
8%	1.369	945.13	6.270	1.252	942.62	5.813
Ref. 0%	1.406	957.93	6.230	1.406	957.93	6.230

3.3 Efecto de los residuos metálicos en las propiedades de calentamiento de las mezclas asfálticas bajo radiación infrarroja

La Fig. 8 muestra los resultados de calentamiento en superficie en estado estacionario de todas las probetas con y sin adición de fibras de lana de acero (Fig. 8(a)) y virutas de acero (Fig. 8(b)) expuestas a radiación infrarroja. Todos los ensayos han sido evaluados simulando la máxima condición de radiación solar en la ciudad de Concepción (ver Tabla 2). De estas Figuras es posible observar que tanto para fibras como para virutas metálicas no hubo una relación directa entre la cantidad de residuo metálico añadido y la temperatura alcanzada por las mezclas. Lo anterior pudo ser debido a la distribución de los residuos metálicos y a la influencia de los huecos de aire al interior de las mezclas.

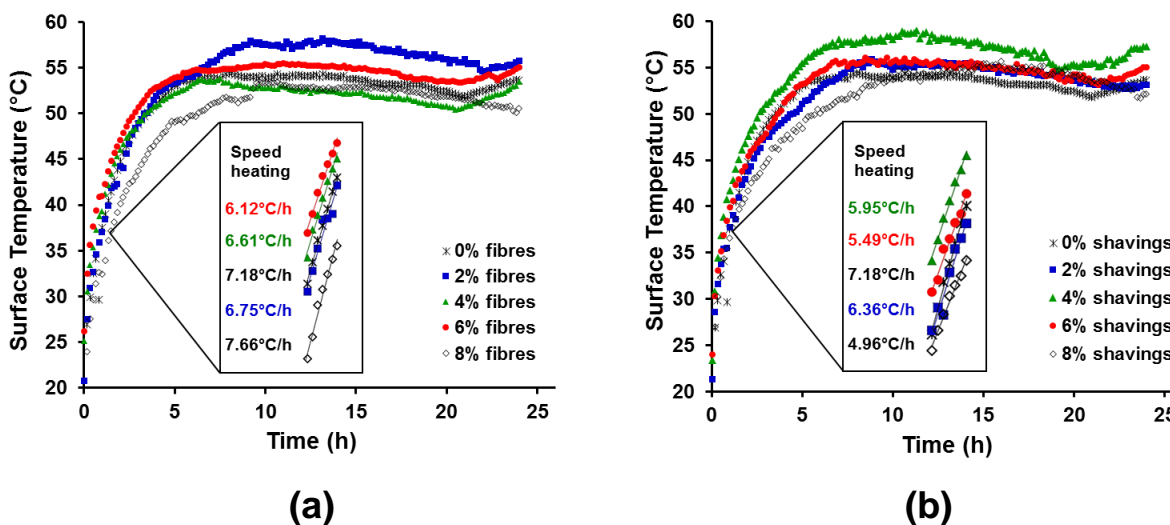


Fig. 8. Evolución de la temperatura en estado estacionario en mezclas con: (a) fibras y (b) virutas.

Como ejemplo, la Fig. 9 muestra imágenes termográficas de la superficie de una mezcla con 4% de fibras y virutas de acero luego de 1 hora (Fig. 9(a) y (b)) y 12 horas (Fig. 9(c) y (d)) de calentamiento bajo radiación infrarroja. Dado que las fibras poseen una mayor capacidad de absorción de calor que los demás componentes de la mezcla, es posible asociar las zonas de mayor temperatura a una mayor concentración de fibras o virutas. Además, en esta figura es posible observar que durante la primera hora de calentamiento, la probeta con 4% de adición de fibras alcanzó una temperatura ligeramente mayor que una probeta con 4% de virutas. Lo anterior significa que la velocidad de calentamiento fue mayor en una mezcla con 4% de fibras de lana de acero durante las primeras horas de calentamiento. Sin embargo, para un tiempo de calentamiento de 12h, la mezcla con 4% de virutas registró la máxima temperatura, como se puede comprobar en la Fig. 8(b). De acuerdo a lo anterior, para evaluar la influencia de la adición de los residuos

metálicos durante las primeras horas de calentamiento, en las Fig. 8(a) y Fig. 8(b) se han calculado las velocidades de calentamiento entre las 2 h y 3 h de exposición a radiación infrarroja. En estas figuras se observa que la adición de residuos metálicos en las mezclas asfálticas, en general, redujo la tasa de calentamiento en comparación a una mezcla sin fibras. Lo anterior pudo ser debido al incremento de los huecos de aire en las mezclas con residuos metálicos. Sin embargo, la adición de fibras de lana de acero en las mezclas provocó una mayor tasa de calentamiento que la adición de virutas metálicas. Esto pudo ser debido a la morfología y distribución de las fibras de lana de acero en el interior de las mezclas. Como ejemplo, se observa que para un 8% de adición de residuo metálico, la mezcla con fibras alcanzó la máxima tasa de calentamiento, con un valor de $7.66\text{ }^{\circ}\text{C/h}$, mientras que una mezcla con virutas alcanzó su mínimo tasa de calentamiento, con un valor de $4.96\text{ }^{\circ}\text{C/h}$. De esta forma, es posible concluir que las fibras de lana de acero fueron más eficientes en el calentamiento de las probetas durante las primeras horas de exposición a radiación infrarroja.

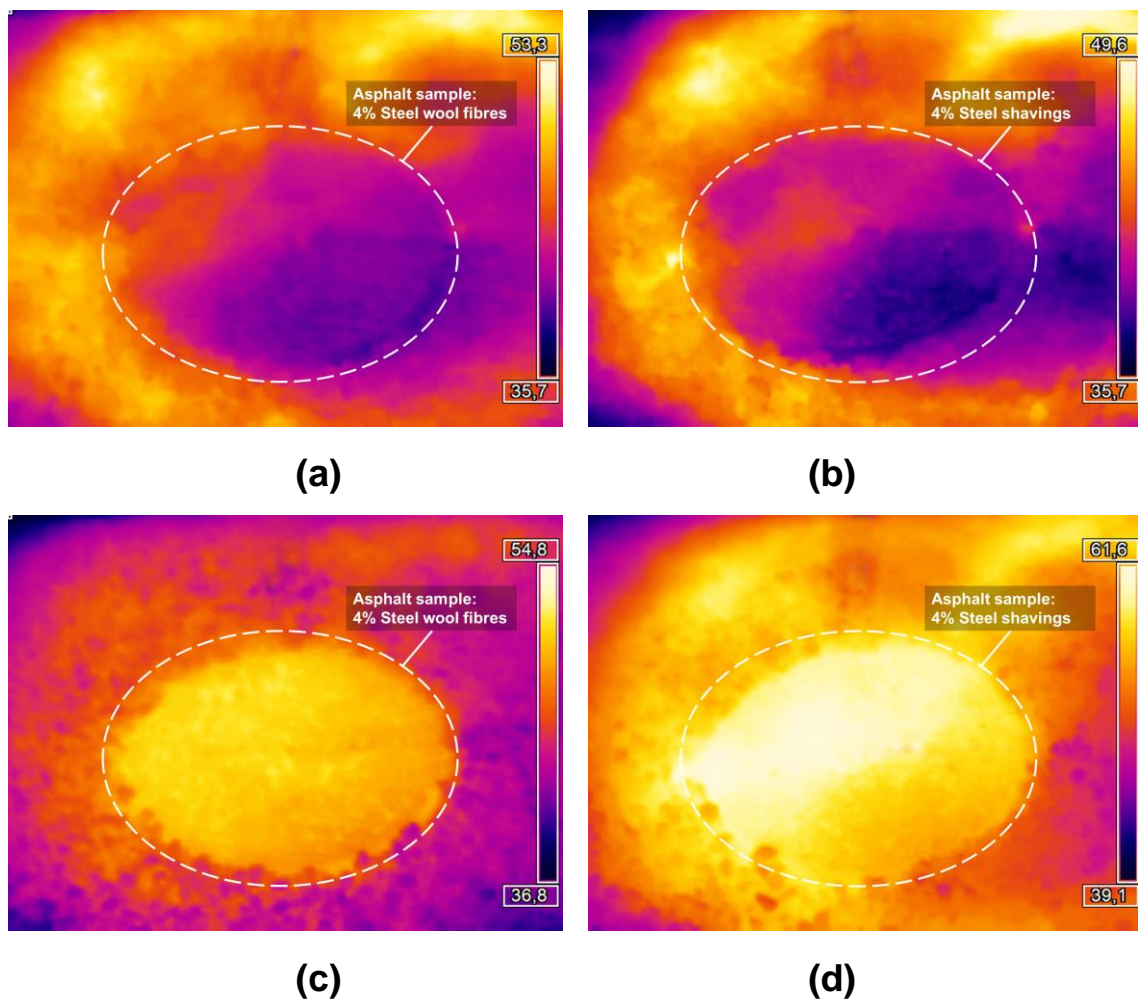


Fig. 9. Imágenes termográficas en mezclas asfálticas con 4% de residuos metálicos para (a-b) 1 hora de calentamiento y (c-d) 12 horas de calentamiento por radiación infrarroja.

Por otra parte, para todas las mezclas se observa que durante las primeras 6 horas de calentamiento se produjo un aumento acelerado de la temperatura y que luego de 12 horas de calentamiento las mezclas alcanzaron un estado estacionario. Para probar esto, la Tabla 4 muestra la temperatura que alcanzaron las mezclas a las 12 y 24 horas de calentamiento además de la variación de temperatura entre estos períodos. En esta Tabla se puede observar que la adición de residuos metálicos, en general, aumentó la variación de la temperatura en comparación con una mezcla sin residuos. Por ejemplo, la variación de temperatura de una mezcla sin residuos fue 0.550°C , mientras que en una mezcla con un 2% la variación de temperatura fue de 1.550°C y 2.176°C para fibras y virutas metálicas, respectivamente. De esta forma, es posible concluir que la adición de residuos metálicos en mezclas asfálticas, en general, no mejoró el equilibrio térmico en condiciones estacionarias, en relación a una mezcla sin residuos. Lo anterior, pudo ser debido al aumento considerable del contenido de huecos de aire con la adición de residuos, ver Tabla 3. Adicionalmente, 12 horas de calentamiento es un tiempo suficiente para representar la temperatura que alcanzan las mezclas durante largos períodos de exposición a radiación infrarroja. Esto permitió disminuir los tiempos de calentamiento bajo radiación infrarroja en las mezclas asfálticas cuando son simuladas a diferentes condiciones de radiación en el prototipo de colector solar.

Tabla 4. Variación de la temperatura superficial de calentamiento de las mezclas bajo condiciones de estado estacionario

Metallic waste content	T° after 12 hr. (°C)		T° after 24 hr. (°C)		ΔT (°C) ($T_{24} - T_{12}$)	
	Fibres	Shavings	Fibres	Shavings	Fibres	Shavings
2%	57.309	55.296	55.759	53.120	-1.550	-2.176
4%	52.415	57.864	53.427	57.243	1.012	-0.621
6%	55.341	55.319	55.033	55.067	-0.308	-0.252
8%	52.933	54.061	50.495	52.097	-2.438	-1.964
Ref. 0%	54.140	54.140	53.590	53.590	-0.550	-0.550

Por otra parte, la Fig. 10 muestra la velocidad de calentamiento en la superficie, en la zona interna y en la zona inferior de las mezclas asfálticas con distintos contenidos de residuos metálicos transcurrida 1 hora en las fases de calentamiento y de enfriamiento. Dado que la finalidad de la mezcla asfáltica es transferir la mayor cantidad de calor posible hacia el fluido calor-portador del colector solar asfáltico, una mayor velocidad de calentamiento del material absorbente de radiación puede reducir el tiempo de transferencia de calor hacia el fluido. Como resultado, el fluido puede alcanzar temperaturas más altas para un tiempo determinado. De esta forma, se observa que la adición de residuos metálicos aumentó la velocidad de calentamiento en superficie en relación a

una mezcla sin residuos metálicos. Nuevamente, los resultados muestran que no hubo una relación directa entre el contenido de residuo metálico y la velocidad de calentamiento. De esta forma, las mezclas con un 4% de adición de fibras y 8% de adición virutas alcanzaron las máximas velocidades de calentamiento con valores de 19.216 °C/h y 20.057 °C/h, respectivamente. Adicionalmente, en las zonas internas e inferior, y dependiendo del contenido de fibras y virutas metálicas adicionadas, las mezclas asfálticas presentaron un mayor o menor incremento en las velocidades de calentamiento en comparación a una mezcla de referencia. De esta forma, en la zona interna un 2% de virutas metálicas y un 8% de fibras de lana de acero lograron los mayores incrementos en la velocidad de calentamiento, con valores de 13.195 °C/h y 12.374 °C/h, respectivamente. Mientras, las máximas velocidades de calentamiento en la zona inferior fueron para mezclas con un 2% de virutas metálicas y un 4% de fibras de lana de acero, con valores de 13.195 °C/h y 12.374 °C/h. De esta forma, y en base a la discusión previa, la adición de un 4% de fibras de lana de acero aumentó la velocidad de calentamiento en relación a una mezcla sin residuo metálico en un 22.6%, 6.8% y 44.1%, en la superficie, en la zona interna y en la zona basal, respectivamente.

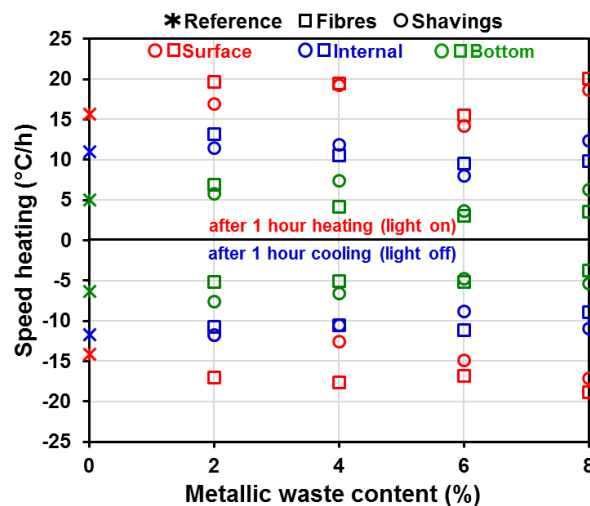


Fig. 10. Aumento y disminución de temperatura después de 1 h de calentamiento y enfriamiento.

Por otra parte, una reducción de la tasa de enfriamiento puede permitir que el calor absorbido por el fluido calor-portador del colector solar asfáltico se conserve por más tiempo, incrementando su eficiencia. De esta forma, la Fig. 10 muestra que las velocidades de enfriamiento fueron independientes del contenido de residuo metálico adicionado a la mezcla asfáltica. Por otra parte, en relación a la velocidad de enfriamiento en superficie, se observa que la adición de virutas de acero en las mezclas asfálticas provocó un enfriamiento más rápido que mezclas con fibras de lana

de acero. De esta forma, la mínima tasa de enfriamiento fue 16.827°C/h , para un 8% de virutas metálicas, y 11.72°C/h para un 2% de adición de fibras de lana de acero. El incremento de la velocidad de enfriamiento para las mezclas con virutas pudo deberse al incremento en el contenido de huecos en estas mezclas. Por otra parte, en la zona interna, la adición de 8% de virutas metálicas y un 6% de fibras de lana de acero alcanzaron la mínima velocidad de enfriamiento, con valores de 8.903°C/h y 8.860°C/h , respectivamente. Mientras, en la zona inferior la adición de 8% de virutas metálicas redujo la velocidad de enfriamiento hasta 0.284°C/h , mientras que un 6% de fibras de lana de acero logró reducir la velocidad de enfriamiento hasta 4.808°C/h . Una observación importante es que un 4% de adición de fibras de lana de acero fue el único contenido de residuo metálico que logró disminuir las velocidades de enfriamiento en la superficie y en la zona interna en relación a una mezcla sin residuos metálicos en un 10.6% y un 9.8%, respectivamente. Estos resultados pueden indicar una menor influencia de la emisividad y del contenido de huecos en la pérdida de calor de la mezcla asfáltica. Finalmente, es posible concluir que una mezcla con un 4% de contenido de fibras de lana de acero representa la mejor opción para el desarrollo y evaluación de un prototipo de colector solar asfáltico debido a que: (1) incrementó la velocidad de calentamiento cuando fue expuesta a largos períodos de radiación infrarroja, (2) incrementó la velocidad de calentamiento en todos los niveles evaluados en condiciones de evaluación transitorias, (3) redujo las velocidades de enfriamiento en superficie y en el interior de la mezcla bajo condiciones de evaluación transitorias. Adicionalmente, considerando las propiedades termofísicas del material absorbente de radiación, un 4% de fibras de lana de acero (4) mejoró las propiedades térmicas evaluadas en relación a una probeta sin residuos metálicos disminuyendo la influencia de los huecos de aire en la pérdida de calor.

3.4 Evaluación del comportamiento térmico de un prototipo de colector solar calentado por radiación infrarroja

La Fig. 11. muestra los perfiles de temperatura durante un ciclo de calentamiento y enfriamiento en la superficie, en el agua y en la zona inferior de un prototipo de colector solar asfáltico fabricado a partir de una mezcla asfáltica con 4% de fibras de lanas de acero. En esta Figura se observa un rápido incremento de temperatura durante las primeras 4 horas de calentamiento. Además, luego de 6 horas de calentamiento el colector alcanzó un equilibrio térmico que fue más estable para la condición de mínima irradiancia. Esto pudo ser debido a que bajo condiciones de máxima irradiancia la energía térmica absorbida por la superficie del colector fue transferida con mayor facilidad a través de los elementos con una mayor conductividad térmica (fibras y tubería de cobre)

hacia las zonas de baja energía. De esta forma, bajo un flujo constante de radiación infrarroja el colector solar siguió aumentando la temperatura en las zonas evaluadas alcanzado un equilibrio térmico sobre las 10 horas de calentamiento. Por el contrario, bajo condiciones de mínima irradiancia el colector absorbió menor energía térmica, de manera que el efecto de la conductividad térmica de las fibras de lana de acero y la tubería de cobre en la transmisión de la energía térmica y el consecuente aumento de temperatura en las zonas inferiores del colector disminuyó. Por lo tanto, las temperaturas registradas bajo la condición de mínima irradiancia fueron más estables y similares, alcanzando un equilibrio térmico en un menor tiempo. Para demostrar esto, la Fig. 11 muestra que bajo la condición de máxima irradiancia y luego de 12 horas de calentamiento mediante radiación infrarroja, la superficie, el agua y la zona basal del colector alcanzaron una temperatura máxima de 58.91°C , 52.88°C y 49.78°C , respectivamente. Por lo tanto, la temperatura del agua fue un 10.23% más baja que la temperatura superficial y un 6.23% más alta que la temperatura en la base del colector. La diferencia de temperatura entre la superficie y el agua pudo ser debido a la disipación el calor generada por los huecos de aire. Por otra parte, en relación a la condición de mínima irradiancia del colector, se observa que luego de 12 horas de calentamiento mediante radiación infrarroja, la superficie, el agua y la zona basal del colector alcanzaron una temperatura máxima de 34.61°C , 33.43°C y 32.52°C , respectivamente. De esta forma, la temperatura del agua fue un 3.32% más baja que la temperatura superficial y un 2.89% más alta que la temperatura en la base del colector.

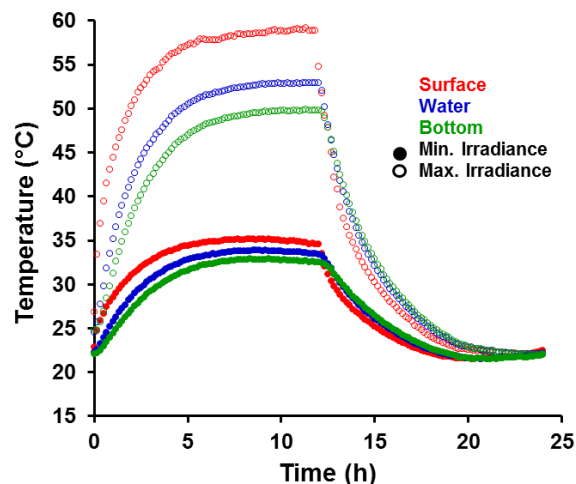


Fig. 11. Evolución de la temperatura del colector solar asfáltico en estado transitorio simulando el mayor y menor valor de las máximas irradiancias en la ciudad de Concepción.

Adicionalmente, en este estudio, se ha calculado la eficiencia en el prototipo de colector solar asfáltico (E_{sc}) para las condiciones de máxima y mínima irradiancia, en base a la ecuación (4):

$$E_{sc}(\%) = \frac{T_{max} - T_0}{T_{max}} \quad (4)$$

Donde T_{max} es la máxima temperatura en el agua para la condición de máxima y mínima irradiancia, en °C y T_0 es la temperatura inicial del agua para la condición de máxima y mínima irradiancia, en °C. Considerando que la temperatura del agua en el prototipo de colector solar asfáltico fue de 24.56°C y 22.29°C para la condición de máxima y mínima irradiancia, respectivamente, el colector obtuvo mayor eficiencia en el caso de la simulación de máxima irradiancia, alcanzando un 54% de eficiencia, muy por encima del 33% obtenido simulando la mínima irradiancia para la ciudad de Concepción. Finalmente, se concluye que el prototipo de colector solar asfáltico permitió absorber la radiación incidente, transmitiendo efectivamente el calor hacia el agua dentro de la tubería. Adicionalmente, en base a la información de radiación solar de la ciudad de Concepción, se encontró que el agua dentro del colector puede alcanzar un rango de temperaturas entre 33°C y 53°C. De esta forma, se estableció un rango de eficiencia entre 33% y 54%. En base a los resultados, el desarrollo de un colector solar asfáltico considerando el prototipo estudiado podría ser potencialmente utilizado para: mantener el confort térmico de los edificios adyacentes al pavimento asfáltico, resolver el problema hielo-deshielo, reducir el efecto isla de calor urbano e incluso proporcionar energía eléctrica para las luminarias en una carretera. Para ello se propone un sistema consistente en un depósito principal, un depósito auxiliar y el colector solar para aprovechar la inercia térmica del sistema, maximizando la ganancia de calor y minimizando la pérdida de calor.

4 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha evaluado la influencia del tipo y contenido de residuos metálicos (fibras y virutas de acero) sobre el comportamiento térmico de mezclas asfálticas y su utilización como colector solar. Los resultados mostraron que la adición de residuos metálicos mejoró la cantidad de calor absorbido por las mezclas, incrementó la cantidad de calor transmitido a zonas de más baja energía y aumentó las tasas de calentamiento de las mezclas en relación a una mezcla sin adición de residuos metálicos. Además, los resultados obtenidos por el colector solar mostraron que se

logró transmitir la radiación incidente al agua, alcanzando una temperatura de hasta 53°C. Finalmente, en base al análisis de los resultados, se pueden emitir las siguientes conclusiones:

1. En este estudio, se encontró que las mezclas asfálticas con residuos metálicos redujeron su densidad aparente, respecto de una mezcla sin residuos. Además, la densidad aparente para muestras con residuos se redujo ligeramente con el incremento del contenido de residuos metálicos.
2. Por otra parte, el contenido de huecos en las muestras con residuos incrementó a medida que aumentó el contenido de residuos metálicos en las mezclas. En general, las mezclas con adición de virutas presentaron menores contenidos de huecos en comparación a las mezclas con adición de fibras de lana de acero.
3. Adicionalmente, se encontró que la adición de residuos metálicos en las mezclas redujo la conductividad térmica y calor específico, en relación a una mezcla asfáltica sin residuo metálico. Además, las fibras de lana de acero, en general, incrementaron la difusividad térmica en comparación a una mezcla de referencia y a las mezclas con virutas metálicas.
4. Para todos los contenidos de residuos metálicos estudiados, se encontró que un 4% de fibras de lana de acero alcanzó una máxima conductividad y difusividad térmica, reduciendo en un 0.68% el calor específico en relación a una mezcla asfáltica sin residuos.
5. Bajo condiciones de calentamiento estacionario, se encontró que las fibras de lana de acero fueron más eficientes en el calentamiento de las probetas durante las primeras horas de exposición a radiación infrarroja. De esta forma, un 8% de adición fibras metálicas en una mezcla asfáltica incrementó la tasa de calentamiento en un 6.7 % en relación a una mezcla sin residuos.
6. Se encontró que la adición de residuos metálicos en mezclas asfálticas no mejoró el equilibrio térmico en condiciones estacionarias, en relación a una mezcla sin residuos. Por otra parte, alrededor de 12 horas de calentamiento fue un tiempo suficiente para representar la temperatura que alcanzan las mezclas durante largos períodos de exposición a radiación infrarroja.
7. Los resultados de calentamiento por radiación infrarroja en condiciones transitorias, mostraron que un 4% de adición de fibras metálicas en una mezcla asfáltica aumentó la velocidad de calentamiento en relación a una mezcla sin fibras en un 22.6%, 6.8% y 44.1%, en la superficie, en la zona interna y en la zona basal, respectivamente. Además, fue el único contenido de residuo metálico que disminuyó las velocidades de enfriamiento en la superficie y en la zona interna en un 10.6% y un 9.8%, respectivamente.
8. Por lo tanto, un prototipo de colector solar asfáltico fabricado con una mezcla asfáltica con 4% de fibras de lana de acero expuesto a radiación infrarroja permitió que el agua alcanzara

temperaturas entre 33 °C y 53 °C. Esto significó un rango de eficiencia entre 33% y 54%, para la mínima y máxima condición de irradiancia en la ciudad de Concepción, respectivamente.

Finalmente, esta investigación correspondió a un primer estudio exploratorio con el objetivo de evaluar nuevas aplicaciones de pavimentos asfálticos con adición de residuos metálicos procedentes de la industria. Así, su desarrollo ha permitido concluir que las mezclas con residuos metálicos podrían ser potencialmente utilizadas para el desarrollo de nuevos pavimentos asfálticos colectores capaces de absorber la radiación solar, almacenando ésta en el interior de la carretera.

5 REFERENCIAS

- ASTM D 5334. (2008). Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure. American Society for Testing and Materials.
- Bijsterveld W.T.V., Houben L.J.M., Scarpas A., Molenaar A.A.A. (2001). Using pavement as solar collector: effect on pavement temperature and structural response. *Journal of the Transportation Research Board*; 1778: 140-148.
- Bobes-Jesus V., Pascual-Muñoz P., Castro-Fresno D., Rodríguez-Hernández J. (2013). Asphalt solar collectors: a literature review. *Applied Energy*; 102: 962-970.
- Chagas G.M.P, Barbosa P.A, Barbosa C.A, Machado I.F. (2013). Thermal Analysis of the Chip Formation in Austenitic Stainless Steel. *Procedia CIRP*; 8:293-298.
- Hassn A., Chiarelli A., Dawson A., Garcia A. (2016a). Thermal properties of asphalt pavements under dry and wet conditions. *Materials & Design*; 91: 432-439.
- Hassn A., Aboufoul M., Wu Y., Dawson A., Garcia A. (2016b). Effect of air voids content on thermal properties of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*; 115: 327-335.
- Kalogirou S.A. (2013). *Solar energy engineering: processes and systems*. Academic Press.
- Mallick R.B., Chen B.L., Bhowmick S. (2009). Harvesting energy from asphalt pavements and reducing the heat island effect. *International Journal of Sustainable Engineering*; 2:3, 214–228.
- Meiarashi S., Ohara T. (1997). Road electric generation system with use of solar power (No. CONF-970456--). Illinois Inst. of Tech., Chicago, IL (United States).

Norambuena-Contreras J, Concha J.L, Borinaga-Treviño R. Thermal evaluation of a sustainable solar collector made of recycled rubber membranes from End of Life Tyres. Submitted in January 2017 to Journal of Cleaner Production (under review).

Norambuena-Contreras J., Concha J.L. (2016). Self-Healing of Asphalt Mixtures Via Microwave Heating: 2016 ISAP Symposium, ISAP2016, Jackson Hole, Wyoming, USA.

Norambuena-Contreras J, García Á. (2016). Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating. *Materials & Design*; 106:404-414.

Norambuena-Contreras, J., Serpell, R., Vidal, G. V., González, A., Schlangen, E. (2016). Effect of fibres addition on the physical and mechanical properties of asphalt mixtures with crack-healing purposes by microwave radiation. *Construction and Building Materials*; 127: 369-382.

Partl M. N., García A., Norambuena-Contreras J., Bueno M. (2014). Influence of steel wool fibers on the mechanical, thermal, and healing properties of dense asphalt concrete. *Journal of Testing and Evaluation*; 42(5), 1-12.

Technical Building Code [Código Técnico de la Edificación (CTE)]. (2010). Catálogo de elementos constructivos del CTE, Spain.

Watts D, Valdés M.F, Jara D, Watson A. (2015). Potential residential PV development in Chile: The effect of Net Metering and Net Billing schemes for grid-connected PV systems. *Renewable and sustainable energy reviews*; 41: 1037-1051.

Wong L.T, Chow W.K. (2001). Solar radiation model. *Applied energy* 69:191-224.

Wu S, Chen M, Wang H, y Zhang Y. (2009). Laboratory study on solar collector of thermal conductive asphalt. *Int J Pavement Res Technol*; 2(4):130–136.